УДК 504:351.77 https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-2-8-13

# Методы определения эффективной высоты трубы при учете рассеивания выбросов в рабочей зоне производств

**В. Я. Манохин, И. А. Иванова, Е. И. Головина**
Воронежский государственный технический университет (г. Воронеж, Российская Федерация)

***Введение.*** С целью определения высоты подъема загрязняющих веществ над источником загрязнения важно знать точное распределения шлейфа газа.
***Постановка задачи.*** Определение концентрации пыли в рабочей зоне асфальтобетонных заводов должно учитывать оценку концентрации вредных веществ в рабочей зоне асфальтобетонного завода. Исследованием работы является анализ методов определения эффективной высоты трубы при учете рассеивания выбросов в рабочей зоне.
***Теоретическая часть.*** В работе рассмотрены зависимости оценки начального подъема струи газа, предложенные Берляндом, Холландом, Бригсом, специалистами Долины Теннеси [1]. Величина начального подъема струи примеси зависит от момента количества движения газов, тепловой мощности скорости сносящего струю ветра и условий термофореза. Представлены сравнительные графики расчета уровня начального подъема струи газа при разных скоростях выхода газа из трубы и постоянной скорости ветра.
***Выводы.*** Учет начального подъема струи нагретого газа дает лучшую сходимость в расчетах максимально приземных концентраций вредных веществ и в оценке расстояний до них.

***Ключевые слова:*** вредные вещества, концентрация, выбросы, движения газов, высота трубы, рабочая зона, подъем струи.

***Для цитирования:*** Манохин, В. Я. Методы определения эффективной высоты трубы при учете рассеивания выбросов в рабочей зоне производств / В. Я. Манохин, И. А. Иванова, Е. И. Головина // Безопасность техногенных и природных систем. — 2021. — № 2. — С. 8−13. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-2-8-13

# Methods for determining the effective height of the pipe taking into account the dispersion of emissions in the production facilities working area

**V. Ya. Manokhin, I. A. Ivanova, E. I. Golovina**
Voronezh State Technical University (Voronezh, Russian Federation)

***Introduction.*** In order to determine the height of the rise of the polluted substances above the source of the pollution, it is important to know the exact distribution of the gas plume.
***Problem Statement.*** The determination of the dust concentration in the working area of asphalt concrete plants should take into account the assessment of the concentration of harmful substances in the working area of the asphalt concrete plant. The study is the analysis of methods for determining the effective height of the pipe, taking into account the dispersion of emissions in the working area.
***Theoretical Part.*** The paper considers the dependences of the estimation of the initial rise of the gas jet, proposed by Berland, Holland, Briggs, and the specialists of the Tennessee Valley. The value of the initial rise of the impurity jet depends on the moment of the amount of gas movement, the thermal power of the wind speed carrying the jet, and the conditions of thermophoresis. The paper presents the comparative graphs of the calculation of the level of the initial rise of the gas jet at different rates of gas exit from the pipe and constant wind speed.
***Conclusion.*** The method of taking into account the initial rise of the heated gas jet gives us better convergence in the calculations of the maximum surface concentrations of harmful substances and in the estimation of distances to them.

***Key words***: pollutants, concentration, emission, gas movement, height of the pipe, working area, rise of the jet.

***For citation***: Manokhin V. Ya., Ivanova I. A., Golovina E. I. Methods for determining the effective height of the pipe taking into account the dispersion of emissions in the production facilities working area; Safety of Technogenic and Natural Systems. 2021;2:8-13. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2021-2-8-13

**Введение.** Большинство аналитических методов, используемых для расчета концентраций вредных веществ в выбросах из труб в рабочей зоне производств, включает в себя использование виртуального или эквивалентного источника. Исследование проводилось с целью определения виртуальной точки начала рассеивания газа [1–2]. Высота виртуального источника получается добавлением начального подъема примеси

члена Δh, обусловленного подъемом струи, к действительной высоте трубы h. Явление истечения газообразной струи из трубы в атмосферу рабочей зоны в основном определяют три набора параметров. К ним относятся характеристики трубы, метеорологические условия и физико-химические свойства выброса. Существует большое количество формул для определения Δh. Большая их часть содержит аргументы, определяемые моментом количества движения и тепловой подъемной силой, то есть первый аргумент связан с вертикальным моментом количества движения газов, выбрасываемых из трубы, а второй определяется разницей между температурой газов на выходе из трубы и температурой окружающей среды [3, 4].

Карпентер и другие провели изучение подъема струи из труб электростанций и пришли к выводу, что формула, предложенная Бригсом, предпочтительнее для оценки подъема струи из труб местных электростанций [5].

**Постановка задачи.** Выбросы, поступающие из дымовых и вентиляционных труб и отверстий в рабочую зону, обладают начальной скоростью подъема и часто перегреты относительно окружающего воздуха. При слабом ветре видно, что дым сначала распространяется почти вертикально вверх и только на некотором уровне начинает распространяться горизонтально. Поэтому предлагается учитывать начальный подъем примеси ΔН и рассматривать некоторый условный источник, расположенный на более высоком уровне (Не =Н+ДН), обычно называемом эффективной высотой [6, 7].

**Теоретическая часть.** Высота подъема загрязняющих веществ над источником загрязнения определяется по формуле [8]:

$$H_c = H_Г + \Delta h,$$

где $H_г$ — эффективная высота (суммарная) подъема шлейфа газа, м;
Δh — начальный подъем струи (газа), м.

В преобразованном виде эта формула, основанная на эмпирических данных, имеет вид [8]:

$$\Delta h = \frac{114 \times C \times F^{1/3}}{u}, \quad (1)$$

где $F = \dfrac{g \times V_s \times d^2 \times (T_s - T_a)}{4 \times T_a}$, $м^4/с^3$; g — ускорение силы тяжести, $м/с^2$; $V_s$ — скорость газа на выходе из трубы, м/с; d — диаметр выходного отверстия трубы, м; $T_s$ — температура газа на выходе из трубы, $^0К$; $T_a$ — температура атмосферного воздуха, $^0К$; $C = 1{,}58 - 41{,}4 \times \dfrac{\Delta\theta}{\Delta z}$ — безразмерный коэффициент; $\dfrac{\Delta\theta}{\Delta z}$ — градиент потенциальной температуры, $^0К/м$; u — скорость ветра на уровне выходного отверстия, м/с. Константа 114 имеет размерность $м^{2/3}$.

Анализ экспериментальных данных показывает, что поворот струи в условиях асфальтобетонных заводов осуществляется на высотах в 10 раз меньше, чем это определено расчетом по формуле (1). Следовательно, константа в формуле долины Теннеси завышена на один порядок, поэтому в дальнейших расчетах значение константы будем принимать равной 11,4 $м^{2/3}$.

Линейная корреляция между С и $\dfrac{\Delta\theta}{\Delta z}$ наблюдается в диапазоне $\dfrac{\Delta\theta}{\Delta z}$ от 0,001 до 0,013 $^0К/м$.

Формула позволяет рассчитать эффективную величину подъема струи над трубой на некотором расстоянии по направлению ветра. Положение максимального подъема струи может быть значительно сдвинуто от трубы по направлению ветра. В результате рассеивание загрязнителей в струе на небольших расстояниях от трубы будет происходить на высоте, которая меньше эффективной высоты H. Результаты методики оценки эффективного подъема струи, в зависимости от расстояния x от трубы, дают зависимость $\Delta h$ в функции $x$ для трех условий устойчивости атмосферы [9, 10]. Для безразличной устойчивости атмосферы ( $-0{,}17 < \dfrac{\Delta\theta}{\Delta z} < 0.16$, где $\dfrac{\Delta\theta}{\Delta z}$ выражается в $^0К/100$ м) и расстоянии до 3 000 м [8] высота подъема струи рассчитывается по формуле:

$$\Delta h = \frac{2{,}5 \times x^{0{,}56} \times F^{1/3}}{u}, \quad (2)$$

где $x$ — расстояние от трубы, м.

Для высоких источников применение формул, которые используют $\Delta h$ совместно с $x$, незначительно изменит профиль концентраций. Однако такие расчеты уже не столь надежны при оценке рассеяния для

относительно невысоких источников [11, 12]. Выбросы из невысоких источников могут привести к приземным концентрациям, которые превышают допустимый уровень. В дополнение к частным формулам, с учетом устойчивости атмосферы, было предложено общее выражение для величины эффективного подъема струи [8]:

$$\Delta h = \frac{173 \times F^{1/3}}{u} \times exp\left(0{,}64 \times \frac{\Delta\theta}{\Delta z}\right), \quad (3)$$

Как и в случае с формулой (1), анализ формулы (3) и результатов расчета позволил сделать вывод о том, что коэффициент 173 завышен на один порядок, в расчетах он будет приниматься равным 17,3.

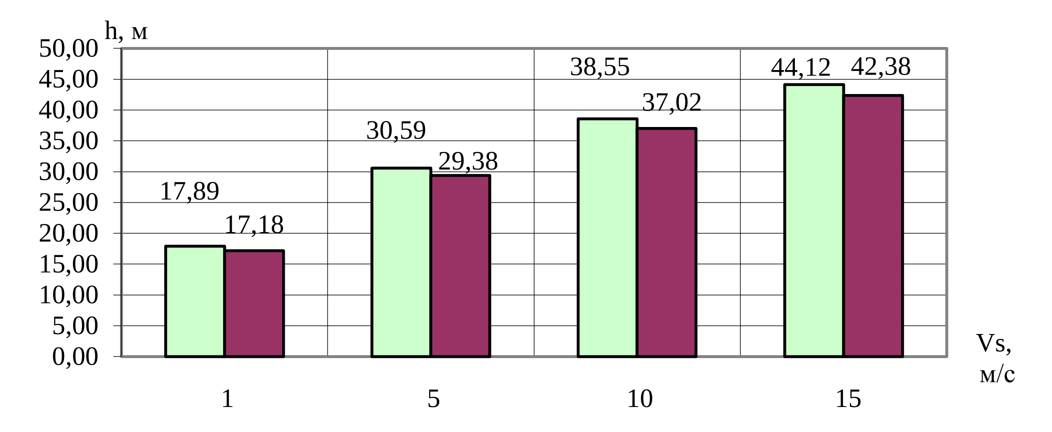



Рис. 1. График сравнения расчета уровня начального подъема струи газа
по формулам (1) и (3) при разных скоростях выхода газа из трубы и постоянной скорости ветра (u=1 м/с)

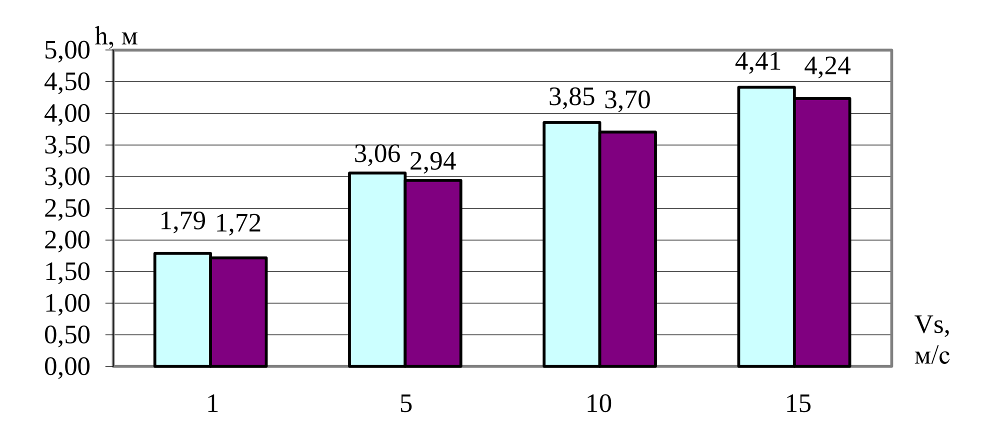



Рис. 2. График сравнения расчета уровня начального подъема струи газа
по формулам (1) и (3) при разных скоростях выхода газа из трубы и постоянной скорости ветра (u=10 м/с)

В работе выполнено сравнение результатов расчетов по формулам (1) и (3) (рис. 1 и 2). При этом установлена хорошая сходимость полученных результатов (расхождение результатов не превышает 5 %). Поэтому в дальнейших расчетах будем использовать только формулу (1).

Простейшие оценки $\Delta h$ основаны на использовании некоторых результатов теории распространения струй в неподвижной среде и нахождении эмпирических связей $\Delta h$ с указанными факторами [13–15].

Дальнейшие расчеты $\Delta h$ при разных скоростях сносящего струю потока показали справедливость оценки константы. В таблице 1 представлены результаты расчета начальной высоты подъема струи газа по зависимостям, предложенным Берляндом (2), Холландом (3), Бригсом (4) и специалистами Долины Теннеси (1).

В расчете менялась скорость истекающего из трубы потока газа ($W_0$=1–15 м/с) и скорость сносящего струю потока воздуха U=1–10 м/с.

Таблица 1

Начальный подъем струи газа

| U, м/с | $W_0$, м/с | Берлянд | Холланд | Бригс | Долина Теннеси |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $\Delta h = \frac{3{,}58 \times R_0 \times W_0}{U}$ м | $\Delta h = \frac{3 \times R_0 \times W_0}{U} + 4 \times 10^{-5} \times \frac{Q_t}{U}$ м | $\Delta h = 2{,}6 \times \left(\frac{F}{U^3}\right)^{\frac{1}{3}}$ $F_t = \frac{g \times R_0^2 \times W_0 \times \Delta T}{T_a}$ м | $\Delta h = \frac{11{,}4 \times C \times F^{\frac{1}{3}}}{u}$ м |
| 1 | 1 | 3,58 | 3,384 | 3,85 | 17,89 |
| 1 | 5 | 17,9 | 15,384 | 6,59 | 30,59 |
| 1 | 10 | 35,8 | 30,384 | 8,31 | 38,54 |
| 1 | 15 | 53,7 | 45,384 | 9,5 | 44,12 |
| 5 | 1 | 0,716 | 0,6768 | 0,77 | 3,57 |
| 5 | 5 | 3,58 | 3,0768 | 1,31 | 6,12 |
| 5 | 10 | 7,16 | 6,0768 | 1,66 | 7,71 |
| 5 | 15 | 10,74 | 9,0768 | 1,90 | 8,83 |
| 10 | 1 | 0,358 | 0,3384 | 0,38 | 1,79 |
| 10 | 5 | 1,79 | 1,5384 | 0,65 | 3,06 |
| 10 | 10 | 3,58 | 3,0384 | 0,83 | 3,85 |
| 10 | 15 | 5,37 | 4,5384 | 0,95 | 4,41 |
| 15 | 1 | 3,58 | 3,384 | 3,85 | 1,19 |
| 15 | 5 | 17,9 | 15,384 | 6,59 | 2,04 |
| 15 | 10 | 35,8 | 30,384 | 8,31 | 2,57 |
| 15 | 15 | 53,7 | 45,384 | 9,51 | 2,94 |

$$\Delta h = \frac{3{,}58 \times R_0 \times W_0}{u}, \quad (4)$$

где $R_0$ — внутренний радиус трубы, м; U — скорость ветра на срезе трубы, м/с; $W_0$ — скорость истекающего из трубы потока газа, м/с;

$$\Delta h = \frac{3 \times R_0 \times W_0 + 4 \times 10^{-5} \times Q_t}{u}, \quad (5)$$

где Q — тепловая мощность источника, кал/с;

$$\Delta h = 2{,}6 \times \left(\frac{F_t}{u^3}\right)^{1/3}, \quad (6)$$

где $F_t = \frac{g \times W_0 \times R_0^2 \times \Delta T}{T_a}$

g — ускорение силы тяжести, м/с$^2$; ΔT — разность температуры уходящего газа и температуры окружающего воздуха $^0$С; $T_a$ — температура окружающего воздуха, $^0$С.

**Выводы.** В работе проведены исследования четырех расчетных моделей при оценке высоты подъема струи. Авторами уточнена оценка величины подъема струи над геометрической высотой трубы в зависимости от различных факторов: импульс струи, температурный перепад. При определении эффективной высоты трубы при учете рассеивания выбросов в рабочей зоне производств данная методика получила более надежный расчет при оценке рассеивания вредных веществ, что подтверждено экспериментами при различных скоростях сносящего струю потока. Справедливость этой оценки подтверждают константы, предложенные Берляндом, Холландом, Бригсом, специалистами Долины Теннеси.

**Библиографический список**

1. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. — Ленинград : Изд-во Гидрометиздат, 1985. — 340 с.

2. Дубовицкий, Д. В. Влияние параметров источника выброса загрязняющих веществ в атмосферу на формирование приземной концентрации примеси / Д. В. Дубовицкий, Н. Г. Малышкин // Инновационное развитие агропромышленного комплекса для обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации : сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф. — 2020. — С. 131–136.

3. Корняков, А. Б. Расчет концентрации выбросов вредных веществ в атмосферу при наличии нескольких источников загрязнений / А. Б. Корняков, Е. В. Троицкая // Экологические системы и приборы. — 2013. — № 8. — С. 12–15.

4. Лупанов, А. П. Выбросы загрязняющих веществ при производстве асфальтобетонных смесей и пути их снижения / А. П. Лупанов, Н. В. Гладышев, Н. Г. Моисеева // Наука и техника в дорожной отрасли. — 2013. — № 4 (67). — С. 37–38.

5. Манохин, В. Я. Научно-практические и методологические основы экологической безопасности технологических процессов на асфальтобетонных заводах : автореф. дис. … д-ра тех. наук / В. Я. Манохин. — Санкт-Петербург, 2004. — 42 с.

6. Манохин, В. Я. Проблемы пожаро-, взрывоопасности на асфальтобетонных заводах / В. Я. Манохин, И. А. Иванова // Технические и социально-гуманитарные аспекты профессиональной деятельности ГПС МЧС России: проблемы и перспективы : сб. тр. IV Междунар. науч.-практ. конф. — Воронеж : Изд-во Воронежский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2009. — С. 120–124.

7. Манохин, В. Я. Основные факторы пожароопасности асфальтобетонных заводов / В. Я. Манохин, И. А. Иванова // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. — 2009. — №1 (1). — С. 17–23.

8. Манохин, В. Я. Определение высоты подъема струи газа в условиях действия сносящего потока воздуха / В. Я. Манохин, Б. Л. Мущенко, И. А. Карасева // Высокие технологии в экологии : сб. тр. 9-ой Междунар. науч.-практ. конф. — Воронеж : Изд-во Воронежский государственный аграрный университет, 2006 — С. 206–213.

9. Приказ Минприроды России от 06.06.2017 N 273 "Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе" (Зарегистрировано в Минюсте России 10.08.2017 N 47734) / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов / docs.cntd.ru : [сайт]. — URL: https://docs.cntd.ru/document/456074826 (дата обращения : 11.02.2021).

10. Пожаро-, взрывоопасность жидких углеводородных топлив на асфальтобетонных заводах / С. Д. Николенко, С. А. Сазонова, В. Я. Манохин, И. А. Иванова // Моделирование систем и процессов. — 2017. — Т. 10, №2. — С. 29–33.

11. Порадек, С. В. Пути улучшения экологической обстановки на АБЗ / С. В. Порадек, В. М. Тупикин // Дорожная экология XXI века : тр. Междунар. науч.-практ. симпозиума. — Воронеж : Изд-во ВГУ–ВГАСУ, 2000. — 367 с.

12. Сборник законодательных нормативных и методических документов для экспертизы воздухоохранных мероприятий / Р. Н. Кузнецов, Н. С. Филимонова, А. М. Шишкин, В. В. Храмовец // Под ред. В. П. Антонова и И. М. Зражевского. — Ленинград : Изд-во Гидрометиздат, 1986. — 318 с.

13. Силкин, В. В. Перспективы применения сжиженного газа / В. В. Силкин, А. П. Лупанов, М. А. Мухин // Строительная техника и технологии. — 2013. — № 3. — С. 64–68.

14. Сполдинг, Д. Б. Основы теории горения. — Москва : Изд-во Государственное энергетическое издательство, 1959. — 320 с.

15. Экотехника: Защита атмосферного воздуха от выбросов пыли, аэрозолей и туманов / Холдинговая группа "Кондор Эко–СФ НИИОГАЗ" / Под ред. Л. В. Чекалова. — Ярославль : Изд-во Русь, 2004. — 424 с.

Сдана в редакцию 16.03.2021
Запланирована в номер 07.04.2021

*Об авторах:*

**Манохин Вячеслав Яковлевич,** профессор кафедры техносферной и пожарной безопасности Воронежского государственного технического университета (394006, РФ, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), доктор технических наук, профессор, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4102-5565, manohinprof@mail.ru

**Иванова Ирина Александровна,** доцент кафедры техносферной и пожарной безопасности Воронежского государственного технического университета (394006, РФ, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2589-3787, ivanova-eco@mail.ru

**Головина Елена Ивановна,** заместитель декана по учебной работе факультета инженерных систем и сооружений, старший преподаватель кафедры техносферной и пожарной Воронежского государственного технического университета (394006, РФ, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2458-2039, u00111@vgasu.vrn.ru

*Заявленный вклад соавторов:*

В. Я. Манохин — научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования; И. А. Иванова — проведение расчетов, подготовка и оформление текста статьи, работа с литературой; Е. И. Головина — анализ результатов исследований, формирование выводов, корректировка выводов.

Submitted 16.03.2021
Scheduled in the issue 07.04.2021

*Authors:*

**Manokhin, Vyacheslav Y.**, Professor, Department of Technosphere and Fire Safety, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh, RF, 394006), Dr. Sci., Professor, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4102-5565, manohinprof@mail.ru

**Ivanova, Irina A.**, Associate Professor, Department of Technosphere and Fire Safety, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh, RF, 394006), Cand. Sci., ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2589-3787, ivanova-eco@mail.ru

**Golovina, Elena I.,** Deputy Dean for Academic Affairs, Faculty of Engineering Systems and Structures, Senior Lecturer, Department of Technosphere and Fire Safety, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh, RF, 394006), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2458-2039, u00111@vgasu.vrn.ru

*Contribution of the authors:*

V. Ya. Manokhin — scientific supervision, formulation of the main concept, goals and objectives of the study; I. A. Ivanova — calculations, preparation and presentation the text of the article, work with literature; E. I. Golovina — analysis of the research results, conclusions, correction of the conclusions.